UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática

Carrera de Ingeniería Civil

Diseño Hidráulico II

RÁPIDA EN FORMA DE ESCALERAS

Nombres:

Gallegos Castro Álvaro Facundo

Morales Sandoval Kelly Belén

Porras Novillo Marlon Brando

Quinchuquí Matango Luis Ariel

Ulquiango Ulco Oscar Danilo

Curso-Paralelo:

S6P2

Docente:

Ing. Salomón Jaya

Fecha de entrega:

22/01/2019

Período Lectivo:

Septiembre 2019- Febrero 2020

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 4
2. OBJETIVOS 5
2.1. Objetivo General 5
2.2. Objetivos Específicos 5
3. MARCO TEÓRICO 5
3.1. Antecedentes 5
3.2. Descripción 5
3.2.1. ¿Qué es? 5
3.2.2. ¿Para qué sirve? 6
3.2.3. ¿Cómo funciona? 6
3.3. Fórmulas 11
3.3.1. Caudal unitario 11
3.3.2. Calado crítico 11
3.3.3. Ley de distribución de Velocidades 12
3.3.4. Dimensionamiento del escalón 12
3.3.5. Dimensionamiento del perfil escalonado de diseño 13
3.3.6. Chequeo de Flujo escalón por escalón 14
3.3.7. Calado en la orilla del escalón 14
3.3.8. Longitud de la caída 14
3.3.9. Profundidad del flujo en el escalón 14
3.3.10. Calado conjugado menor 15
3.3.11. Energía al inicio del disipador 15
3.3.12. Energía disipada 15
3.3.13. Energía al pie del disipador 16
3.3.14. Altura de pared 16
ESCALERAS AUTO-AIREADAS 16

a. Restricción para el uso de perfil escalonado auto aireado (Sandeep y Ramesh 2000) 16

b. Caudal unitario 16

c. Calado crítico 17

d. Calado Normal (Boes y Hager 2003) 17

e. Relación $\boldsymbol{yc/h}$ Flujo Rasante 17

f. Dimensionamiento del escalón 17

g. Dimensionamiento del perfil escalonado de diseño 17

h. Chequeo de Flujo Rasante (Chason 2002) 18

i. Restricción para el uso de perfil escalonado auto aireado REVISIÓN (Sandeep y Ramesh 2000) 18

j. Longitud hasta el punto de incepción 19

k. Longitud hasta el punto de incepción 19

l. Calado en el Punto de Incepción 20

n. Concentración media de aire 20

o. Factor de Fricción para flujo aireado 20

p. Factor de Fricción para flujo aireado 20

q. Parámetro de vertido 21

r. Energía al inicio del disipador 21

s. Energía disipada 21

t. Energía al pie del disipador 21

u. Calado al final del perfil escalonado 22

y. Profundidad del flujo en el escalón 22

4. DATOS Y CÁLCULOS 23

ESCALERAS 23

ESCALERAS AUTO AIREADAS 29

5. CONCLUSIONES 35

6. RECOMENDACIONES 36

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 36

8. ANEXOS 37

1. INTRODUCCIÓN

El agua potable es esencial para la vida, es el líquido más importante en la naturaleza sin el cual no podríamos vivir. (ESSAP, 2014)

Debido a que la disponibilidad de agua de calidad y segura es un derecho humano, se debe buscar la manera de abastecer a las personas de este dichoso líquido por el cual es necesario realizarlo mediante una conducción. (Noksel, 2015)

Las conducciones nacen de la necesidad del ser humano de ser capaz de transportar un fluido de un lugar a otro, sea para consumo, riego, ganadería, etc. Sin embargo, las conducciones de agua sean a gravedad o presión, en su trayectoria tiene que vencer varios obstáculos como pendientes muy elevadas, quebradas, para que el agua llegue sin problemas.

Debido al surgimiento del problema de las grandes presiones que se puede tornar en el transcurso del flujo, nace la necesidad de solucionarlos de una manera efectiva, midiendo indicadores técnicos y económicos.

Varios ingenieros alrededor del mundo, han dedicado su tiempo para realizar las debidas investigaciones acerca de la disipación de energía en obras hidráulicas, por el cual, nacen muchas opciones que se ajustan a las diferentes condiciones del terreno, clima, etc.

Actualmente en el sistema académico se cuenta con varios métodos tales como los pozos disipadores de energía, gradas, caídas, saltos sky, disipador por tipo vórtice, entre otros.

Existe un método que es objeto de estudio muy interesante, el cual es el disipador de energía tipo rápida con escaleras donde se refiere a un canal de pendiente pronunciada, donde, en el transcurso de su trayectoria cuenta con una serie de gradas y tiene como principal función la disipación de energía.

En el presente trabajo se ha considerado diseñar un disipador de energia tipo rápida con escaleras, teniendo en consideración el respectivo criterio y la bibliografía correspondiente, para posteriormente presentarlo en un gráfico utilizando el software AUTOCAD, para una mejor comprensión del sistema diseñado.

2. OBJETIVOS

2.1.Objetivo General

Conceptualizar la metodología de diseño de un canal con flujo escalonado y autoereado.

2.2.Objetivos Específicos

- Diseñar un canal con flujo escalonado y autoaereado en base a datos conocidos.
- Desarrollar el correcto procedimiento para el diseño procurando cumplir con las especificaciones y condiciones del caso propuesto.
- Elaborar una guía electrónica con el desarrollo y resultados de diseño.

3. MARCO TEÓRICO

3.1.Antecedentes

Una parte fundamental de la Hidráulica de canales está enfocada a los diferentes tipos de disipadores de energía, esto debido a ciertos problemas que un ingeniero puede presentar en obras hidráulicas, esto debido a las velocidades que se puede presentar en ocasiones en un canal, y las erosiones que estas pueden generar, o de la misma forma, la generación del efecto de cavitación.

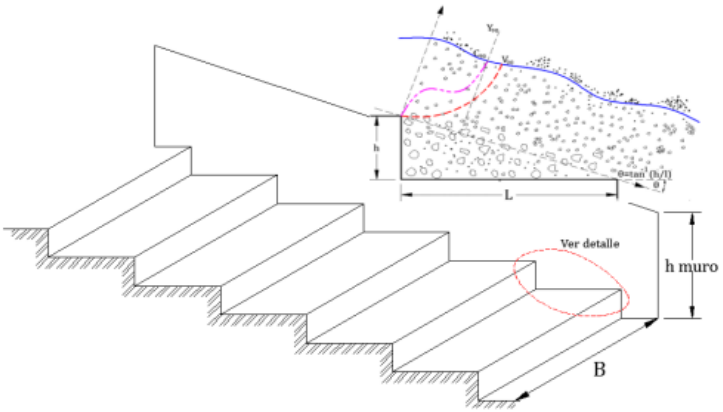
Se establece en rápidas lisas a mayor diferencia de nivel y mayor pendiente, las velocidades de flujo, aumentan generando una separación del flujo sobre la rápida del material, en este caso en canales el concreto, y una forma de mitigar estos efectos de la velocidad sobre el concreto es incrementando su rugosidad.

3.2.Descripción

3.2.1. ¿Qué es?

Una rápida en forma de escalera es un canal escalonado inclinado, en donde L es la huella o longitud del escalón, h es la atura o contrahuella del escalón, B es el ancho del canal y, θ es el ángulo que forma la rasante del fondo del escalón, con la línea horizontal (Rosado, 2017).

Ilustración 1 Canal Escalonado



Fuente: *Rosado, 2017*

3.2.2. ¿Para qué sirve?

Se colocan con mayor frecuencia en canales de descarga o canales en los cuales la diferencia de nivel es vencible únicamente con el diseño de rápidas escalonadas, que ayudan a disminuir la velocidad en el flujo y disipan la energía por medio del impacto e incorporación de aire al agua (Del Toro, 2013).

3.2.3. ¿Cómo funciona?

Los escalones de un canal escalonado actúan como elementos rugosos, lo que conlleva, a que se presente un aumento en la fricción en el fondo del canal y una disminución de la energía residual al pie del canal (Rosado, 2017).

Un punto muy importante, es que, en el canal, y principalmente, a lo largo de las rápidas consideradas dentro de la topografía del terreno, se presentan velocidades de flujo que pueden ocasionar erosiones; es decir, si la lámina de agua se separa del concreto debido a su velocidad, automáticamente se produce una zona de baja presión, generando el efecto de cavitación (Del Toro, 2013).

Una forma de mitigar los efectos de la velocidad sobre el concreto es incrementando su rugosidad, de ese modo el flujo tendrá mayor fricción y por consiguiente las velocidades se reducirán.

Otro método es introducir aire en el flujo de agua, logrando un fluido que sea mezcla de agua y pequeñas burbujas de aire de manera que la proporción de éste sea superior al 8% (Mateos, 1997). La forma de conseguir que el aire penetre en la masa de agua puede ser de forma forzada o de manera natural (Del Toro, 2013).

En las rápidas escalonadas, la alta turbulencia del flujo en la proximidad de los escalones provoca el acortamiento de la zona de flujo no aireado si se compara con una rápida lisa una vez que alcanza el punto donde se inicia la aireación natural, manteniéndose de forma permanente un alto contenido de aire en la masa fluida que desde este último punto se incrementa y se estabiliza (Del Toro, 2013).

Ilustración 2 Esquema

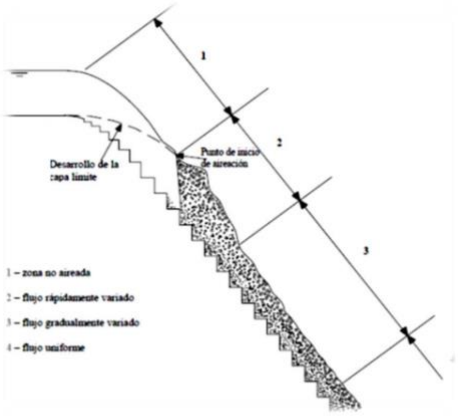


Figura 2.1.- Funcionamiento de una rápida escalonada.

Fuente: Del Toro , 2013

Las condiciones del flujo sobre los canales escalonados dependen rigurosamente de la altura del escalón y del caudal. De acuerdo con Llano (2003), el flujo sobre los canales escalonados comenzó a ser ampliamente estudiado por algunos investigadores a partir de 1978 (Essery & Horner, 1978), (Stephenson, 1979), (Rajaratnam, 1990), (Andre et al., 1994), (Chanson, 1994b).

En estas investigaciones se determinó que el comportamiento del flujo sobre los canales escalonados se podía clasificar en tres regímenes de flujos: uno denominado régimen de flujo rasante, otro régimen de flujo saltante y transicional (Rosado, 2017).

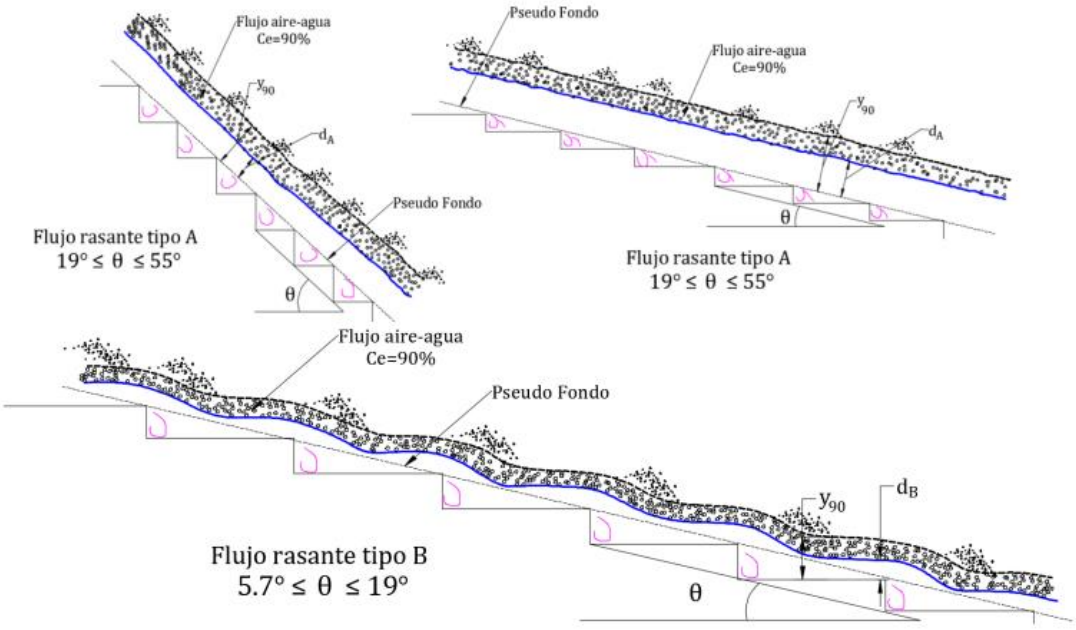
3.2.3.1. Flujo rasante

El flujo rasante tiene un recorrido coherente y puede asemejarse a un flujo uniforme sobre el canal escalonado, con formación de vórtices que recirculan sobre el escalón. Estos vórtices se desarrollan a partir de la transmisión de esfuerzos cortantes entre el flujo y el fondo del canal (Rajaratnam, 1990).

De acuerdo con Pegram, et al. (1999) el flujo rasante ocurre si la altura de flujo es superior a la altura del escalón o a la altura de rugosidad relativa.

Ohtsu determinó que en canales escalonados con pendiente entre, $19° \leq \theta \leq 55°$, siempre se presentará un flujo tipo A, mientras que en canales con pendiente entre $5.7° \leq \theta \leq 19°$, se pueden presentar las dos condiciones de flujo, tipo A y tipo B. En la Figura 3-4 se presentan de manera esquemática los diferentes tipos de flujos rasantes que se pueden presentar en canales escalonados (Rosado, 2017).

Ilustración 3 Flujo en el canal



Fuente: Del Toro, 2013

3.2.3.2. Concentración media del aire

Chanson (1994) presentó un análisis basado en análisis con los resultados obtenidos por Straub & Anderson (1958) y Aivazyan (1986) determinó que la media de la concentración de aire es independiente de la descarga, de la rugosidad relativa, y de la profundidad del flujo, y que a su vez éste era una función de la pendiente del canal. De acuerdo con Chanson (1994a) en canales escalonados de pendientes hasta 50º, la concentración media del aire puede ser estimada como:

$$\bar{C} = 0.9 \sin \theta$$

3.2.3.3. Flujo saltante

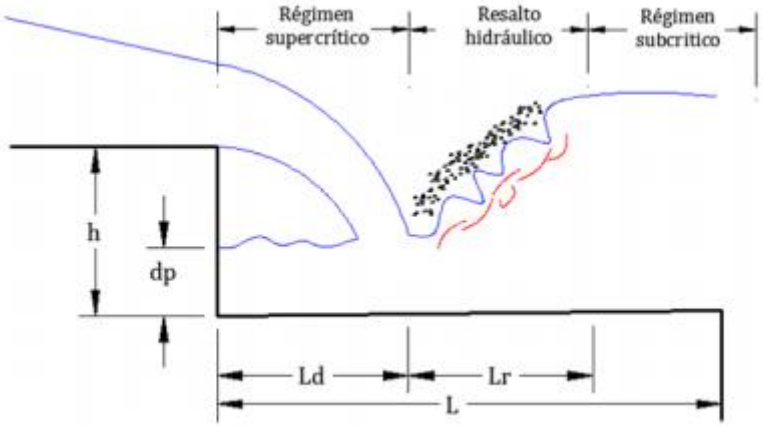
Un flujo saltante se caracteriza por representar caídas libres, que chocan sucesivamente contra el fondo, escalón tras escalón (Chanson, 1994b). El flujo sale de un escalón con una superficie libre determinada, y cae sobre el próximo escalón; si este flujo, al caer, logra quedar sobre la huella del canal, se formará un resalto hidráulico parcial o totalmente

desarrollado (Amador, 2005), de lo contrario, el flujo comenzará a caer de manera desordenada sobre los escalones, llegando, en algunos casos, a no impactar al más próximo (Rosado, 2017).

3.2.3.4. Flujo saltante con resalto hidráulico completamente desarrollado

El flujo saltante con resalto hidráulico completamente desarrollado ocurre para caudales bajos o en situaciones en donde la pendiente del canal es pequeña. Inmediatamente después de la caída, se desarrolla un flujo supercrítico, y aguas abajo, en razón de la pendiente del escalón, se presenta un flujo subcrítico, por lo cual se genera un "Resalto hidráulico", como resultado de la transición de un flujo en régimen supercrítico y un flujo en régimen subcrítico. Luego de que el flujo alcanza la profundidad secuente 17 Marco Teórico mayor (flujo subcrítico), y justo antes de llegar al borde exterior del escalón, el flujo pasa por la profundidad crítica (Rosado, 2017).

Ilustración 4 Flujo saltante con resalto completamente desarrollado



Fuente: Del Toro , 2013

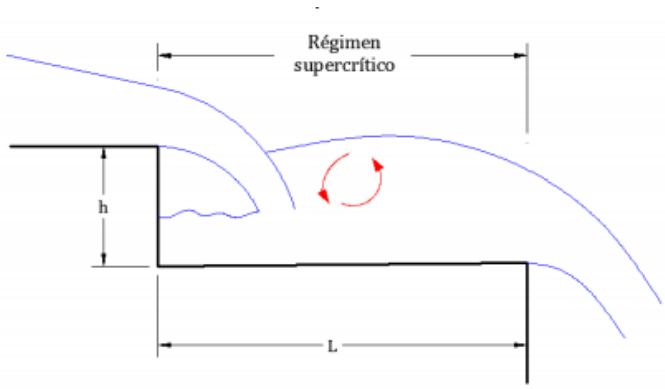
Por lo anterior, puede afirmarse que el flujo saltante, con resalto hidráulico completamente desarrollado, se presentará si la longitud del escalón (huella) es mayor que la longitud de caída del chorro, más la longitud del resalto hidráulico.

3.2.3.5. Flujo saltante con resalto hidráulico parcialmente desarrollado

Si el caudal aumenta o la huella del escalón es muy corta, el flujo saltante no alcanzará a desarrollar completamente el resalto hidráulico. El flujo, antes de que se forme el resalto, caerá sobre el siguiente escalón. Este tipo de comportamiento del flujo, se denomina resalto

hidráulico parcialmente desarrollado. En este caso, para determinar la profundidad conjugada mayor del resalto hidráulico, será necesario, entonces, determinar el perfil general del flujo gradualmente variado (Rosado, 2017).

Ilustración 5 Flujo Saltante con resalto hidráulico parcialmente desarrollado

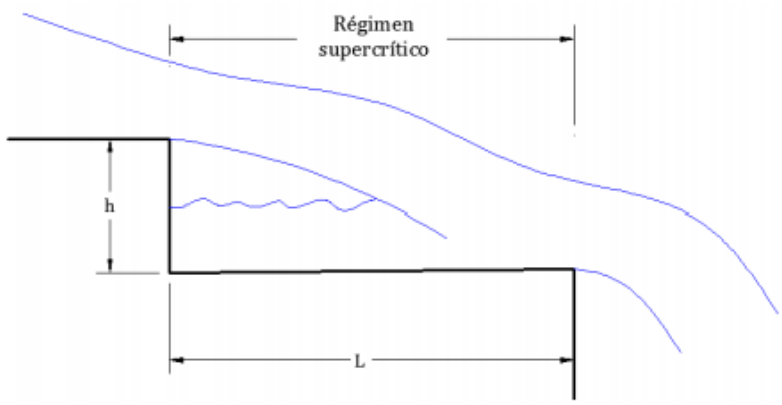


Fuente: Del Toro, 2013

3.2.3.6. Flujo saltante sin resalto hidráulico

Una tercera condición del régimen de flujo saltante se presenta cuando el flujo no alcanza a salir del régimen de flujo supercrítico (F > 1), y no se forma un resalto hidráulico. Para que ocurra esta condición, debe existir un aumento en el caudal o un incremento en la 19 Marco Teórico pendiente; el flujo desarrollado sobre el escalón siempre será supercrítico (la disipación de la energía solamente se deberá a los impactos del flujo contra la huella del escalón).

Ilustración 6 Régimen flujo



Fuente: Del Toro, 2013

3.2.3.7.Flujo transicional

Chuts & Yasuda (1997) determinaron que, entre el régimen del flujo saltante y el régimen rasante, se presenta un régimen intermedio, denominado régimen de flujo de transición. De acuerdo con Amador (2005), el régimen de flujo de transición se describe por la coexistencia del flujo saltante y el flujo rasante en distintos escalones. A lo largo del 23 Marco Teórico recorrido del canal, se pueden apreciar cavidades o vacíos de aire en algunos escalones, mientras que en otros se observa una recirculación estable del flujo (formación de flujos secundarios o vórtices). Puede decirse, entonces, que el régimen de flujo de transición presenta una apariencia caótica con gran aireación del flujo, donde, debido a las irregularidades y a la no coherencia del flujo, no es fácil determinar el perfil real de flujo (ver Figura 3-10). Este tipo de régimen de flujo se caracteriza por presentar fuertes pulsaciones y salpicaduras a lo largo del recorrido, presentando variaciones de las propiedades del flujo (LLano, 2003). La Figura 3-10 muestra la operación de un canal escalonado, bajo el régimen de flujo de transición. Como se puede apreciar, el flujo, una vez es descargado por la alcantarilla, comienza a presentar caídas caóticas y erráticas, con una gran longitud del canal, en donde se presentan salpicaduras (Rosado, 2017).

3.3.Fórmulas

3.3.1. Caudal unitario

$$\boldsymbol{q_u = \frac{Q}{B}}$$

Donde:

$\mathrm{Q} = \text{caudal de entrada}$

$B = \text{ancho del canal}$

3.3.2. Calado crítico

$$\boldsymbol{y_c = \sqrt[3]{\frac{q_u^2}{g}}}$$

Donde:

$\mathrm{q_u} = \text{caudal unitario}$

$g = \text{aceleración de la gravedad}$

3.3.3. Ley de distribución de Velocidades

$$1{,}03 < \alpha < 1{,}36 \quad Experimentales$$

$$3{,}5 < \alpha < 4 \qquad (Frizell\ y\ Tozzy)$$

Adoptado:

- $\alpha_{coriolis} = 1{,}2$
- $N_{coriolis} = 3{,}5$

3.3.4. Dimensionamiento del escalón

$$\boldsymbol{h \geq 0.0764 * q^{\frac{2}{3}}\ (M.\ Tozzi)}$$

$$\boldsymbol{h_{ópt} = 0.3\ y_c}$$

Donde:

$$h_{ópt} = \text{altura de contra huella óptimo}$$

Tabla 1 Tabla alturas óptimas en función del caudal unitario

q	$\mathbf{y_c}$	$\mathbf{h_{opt}}$
$(\mathbf{m^2/s})$	$(\mathbf{m})$	$(\mathbf{m})$
1	0,47	0,14
2	0,74	0,22
5	1,37	0,41
7	1,71	0,51
10	2,17	0,65
12	2,45	0,73

$$\boldsymbol{\frac{y_c}{h} = \frac{\left(1{,}43 - \frac{h}{l}\right)^{0.26}}{1{,}4}}$$

$$\boldsymbol{si\ \ 0,1 \leq \frac{h}{l} \leq 1,43 \qquad (Ohtsu\ \&\ Yasuda)}$$

$$\boldsymbol{\frac{y_c}{h} = 0.89\ - 0.4\frac{h}{l} \qquad (Chanson,\ 2002)}$$

3.3.5. Dimensionamiento del perfil escalonado de diseño

$$\boldsymbol{\frac{h}{l} = i}$$

$$\textbf{\#de contrahuellas} = \frac{\Delta}{\mathrm{h_{asum}}}$$

Donde:

Δ= diferencia de cotas

i = pendiente del terreno

$\mathrm{h_{asum}}$ = altura asumida

$\mathrm{H_d}$ = diferencia de niveles final del canal

$\mathrm{L_d}$ = Longitud final del canal

$$\textbf{\#de huellas} = \textbf{\#de contrahuellas} - \mathbf{1}$$

$$\mathbf{H_d} = \textbf{\# de contrahuellas}\ * \mathbf{h_{asum}}$$

Donde:

$\mathrm{h_{asum}}$ = altura asumida

$\mathrm{H_d}$ = diferencia de niveles final del canal

$$\boldsymbol{L_d = \#\ de\ huellas\ * l_{asum}}$$

Donde:

$\mathrm{L_d}$ = Longitud final del canal

$\mathrm{l_{asum}}$ = longitud asumida

$$\boldsymbol{L_r = \sqrt{H_d - L_d}}$$

Donde:

L_r = Longitud real final del canal

L_d = longitud horizontal final del canal

3.3.6. Chequeo de Flujo escalón por escalón

$$\frac{y_c}{h} < 0.89 - \frac{0.4h}{l} \ (Chanson\ 2002)$$

Donde:

y_c = calado crítico

l = longitud de la huella

h = altura de grada

3.3.7. Calado en la orilla del escalón

$$y_b = 0.715 * y_c \ (Chanson\ 2002)$$

Donde:

y_b = calado en la orilla

y_c = calado crítico

3.3.8. Longitud de la caída

$$L_c = 4.30 * h * \left(\frac{h}{l}\right)^{0.81} \ (Chanson\ 2002)$$

Donde:

h = altura de grada

L_c = longitud de caída

l = longitud de la huella

3.3.9. Profundidad del flujo en el escalón

$$y_p = h * \left(\frac{h}{l}\right)^{0.66} \ (Chanson\ 2002)$$

Donde:

y_p = calado en la orilla

h = altura de grada

l = longitud de la huella

3.3.10. Calado conjugado menor

$$\boldsymbol{y_{cm} = 0.54 * h * \left(\frac{h}{l}\right)^{1.275}} \quad (\boldsymbol{Chanson\ 2002})$$

Donde:

y_{cm} = calado conjugado menor

h = altura de grada

l = longitud de la huella

3.3.11. Energía al inicio del disipador

$$\boldsymbol{E_1 = \frac{2}{3} y_c} + \Delta$$

Donde:

E_1 = energía al inicio del disipador

Δ= diferencia de cotas

y_c = calado crítico

3.3.12. Energía disipada

$$\Delta \boldsymbol{E} = \Delta - \boldsymbol{y_c}$$

Donde:

$\Delta \boldsymbol{E}$ = energía disipada

Δ= diferencia de cotas

y_c = calado crítico

3.3.13. Energía al pie del disipador

$$\boldsymbol{E_2 = E_1 - \Delta E}$$

Donde:

E_2 = energía al pie del disipador

$\Delta \boldsymbol{E}$ = energía disipada

E_1 = energía al inicio del disipador

3.3.14. Altura de pared

$$\boldsymbol{h_p = y_p + y_c}$$

Donde:

y_p = calado en la orilla

h_p = altura de pared

y_c = calado crítico

ESCALERAS AUTO-AIREADAS

a. *Restricción para el uso de perfil escalonado auto aireado (Sandeep y Ramesh 2000)*

$$\boldsymbol{\frac{\Delta}{y_c} < 10}$$

b. *Caudal unitario*

$$\boldsymbol{q_u = \frac{Q}{B}}$$

Donde:

Q = caudal de entrada

B = ancho del canal

c. Calado crítico

$$\boldsymbol{y_c = \sqrt[3]{\frac{q_u^2}{g}}}$$

Donde:

q_u = caudal unitario

g = aceleración de la gravedad

d. Calado Normal (Boes y Hager 2003)

$$\boldsymbol{y_n = y_c * 0.215(sen\ \propto)^{1/3}}$$

e. Relación y_c/h Flujo Rasante

f. Dimensionamiento del escalón

$$\boldsymbol{\frac{y_c}{h} = 1,2 - 0,325 * \frac{h}{l}} \qquad \boldsymbol{para\ 0,5 \leq \frac{h}{l} \leq 1,7} \quad (\boldsymbol{Chanson\ 2002})$$

$$\boldsymbol{h_{ópt} = 0.3\ y_c}$$

g. Dimensionamiento del perfil escalonado de diseño

$$\boldsymbol{\frac{h}{l} = i}$$

$$\textbf{\#de contrahuellas} = \frac{\Delta}{h_{asum}}$$

Donde:

Δ= diferencia de cotas

i = pendiente del terreno

h_{asum} = altura asumida

H_d = diferencia de niveles final del canal

L_d = Longitud final del canal

$$\textbf{\#de huellas} = \textbf{\#de contrahuellas} - \mathbf{1}$$

$$\mathbf{H_d = \# \text{ de contrahuellas } * h_{asum}}$$

$$\boldsymbol{L_d = \# \text{ de huellas } * l_{asum}}$$

Donde:

L_d = Longitud final del canal

l_{asum} = longitud asumida

$$\boldsymbol{L_r = \sqrt{H_d - L_d}}$$

Donde:

L_r = Longitud real final del canal

L_d = longitud horizontal final del canal

h. Chequeo de Flujo Rasante (Chason 2002)

$$\boldsymbol{\frac{y_c}{h} > 1,20 - 0,325 * \frac{h}{l}}$$

Donde:

y_c = calado crítico

h = huella

l = longitud de la huella

i. Restricción para el uso de perfil escalonado auto aireado REVISIÓN (Sandeep y Ramesh 2000)

$$\frac{\Delta}{yc}$$

Donde:

$\Delta =$ diferencia de cotas

$y_c =$ calado crítico

j. Longitud hasta el punto de incepción

j.1. Rugosidad Relativa del Escalón

$$\boldsymbol{k = h * cos \propto}$$

j.2. Froude de Rugosidad (Chamani)

$$\boldsymbol{F_i = \frac{q_u}{\sqrt{g * \frac{h}{l} * k^3}}}$$

Donde:

$q_u =$ caudal unitario

$\boldsymbol{F_i} =$ froude de rugosidad

$g =$ aceleración de la gravedad

$h =$ altura de grada

k. Longitud hasta el punto de incepción

$$\boldsymbol{L_i = k * 9.6528 * F_i^{0.7737}} \ (\boldsymbol{Gerardo\ Rendón})$$

$$\boldsymbol{L_i = \frac{9.72 * q_u^{0.86} * cos \propto_d}{(g * sen \propto_d)^{0.43} * h^{0.29}}} \ (\boldsymbol{Boes,\ 2000})$$

Donde:

$q_u =$ caudal unitario

$g =$ aceleración de la gravedad

$h =$ huella

l. Calado en el Punto de Incepción

Froude de Rugosidad (Chason)

$$\boldsymbol{F = \frac{q_u}{\sqrt{g * sen \ \propto * K^3}}}$$

Donde:

q_u = caudal unitario

g = aceleración de la gravedad

m. Calado en el Punto de Incepción

$$\boldsymbol{y_i = k * \frac{0.4034}{(sen \ \propto)^{0.04}} * (F *)^{0.592}}$$

n. Concentración media de aire

$$\boldsymbol{\bar{C} = 0.9 * sen \ \propto_d}$$

o. Factor de Fricción para flujo aireado

$$\boldsymbol{f_e = 0.124(1 + \tanh\left(2.5 * \frac{0.5 - \bar{c}}{\bar{c}(1 - \bar{c})}\right)}$$

Donde:

f_e = factor de fricción

p. Factor de Fricción para flujo aireado

$$1{,}03 < \alpha < 1{,}36 \quad Experimentales$$

$$3{,}5 < \alpha < 4 \qquad (Frizell\ y\ Tozzy)$$

Adoptado:

- $\alpha_{coriolis} = 1{,}2$
- $N_{coriolis} = 3{,}5$

q. Parámetro de vertido

$$\boldsymbol{A = \left(\frac{fe}{8 * sen \propto_d}\right)^{\frac{1}{3}} * \cos \propto_d + \frac{\propto_d}{2} * \left(\frac{fe}{8 * sen \ \propto_d}\right)^{\frac{2}{3}}}$$

r. Energía al inicio del disipador

$$\boldsymbol{E_1 = \frac{2}{3} y_c + \Delta}$$

Donde:

E_1 = energía al inicio del disipador

Δ= diferencia de cotas

y_c = calado crítico

s. Energía disipada

$$\boldsymbol{\Delta E = y_c * \left(\frac{3}{2} + \frac{\Delta}{y_c} - A\right)}$$

Donde:

$\Delta \boldsymbol{E}$ = energía disipada

Δ= diferencia de cotas

y_c = calado crítico

t. Energía al pie del disipador

$$\boldsymbol{E_2 = E_1 - \Delta E}$$

Donde:

E_2 = energía al pie del disipador

$\Delta \boldsymbol{E}$ = energía disipada

E_1 = energía al inicio del disipador

u. Calado al final del perfil escalonado

$$y_2 = \frac{Q}{b\sqrt{E_2 * 2 * g}}$$

v. Altura de agua para un flujo aireado al 90% en una distancia $Li < x \leq Lr$

$$y_{90} = 0.55 * \left(\frac{q_u^2 * h}{g * sen \ \propto_d}\right)^{\frac{1}{4}} * \tan h\left(\sqrt{\frac{g * h * sen \ \propto_d}{3 * q_u(x - Li)}} + 0.42\left(\frac{q_u^{10} * h^3}{(g * sen \ \propto_d)^5}\right)^{\frac{1}{18}}\right)$$

w. Altura de agua para un flujo aireado al 18% para una distancia 100 m

$$y_c\% = \frac{y_{90} * \overline{C} * 100}{90}$$

x. Altura de paredes del Canal

$$y_d = 1.2 * y_{90}$$

Donde:

y_d = altura de pared del canal

y. Profundidad del flujo en el escalón

$$y_p = h * \left(\frac{h}{l}\right)^{0.66} \ (Chanson\ 2002)$$

Donde:

y_p = calado en la orilla

h = huella

l = longitud de la huella

4. DATOS Y CÁLCULOS

Tabla 2

DATOS DE ENTRADA	VALOR	UNIDAD
Caudal de Entrada (Q)	15	m3/s
Diferencia de cotas (Δ)	22	m
Ángulo de Inclinación del terreno (α)	60	°
Ancho del canal (B)	6	m
Longitud del canal (L)	50	m
Aceleración de la Gravedad (g)	9.81	m/s2

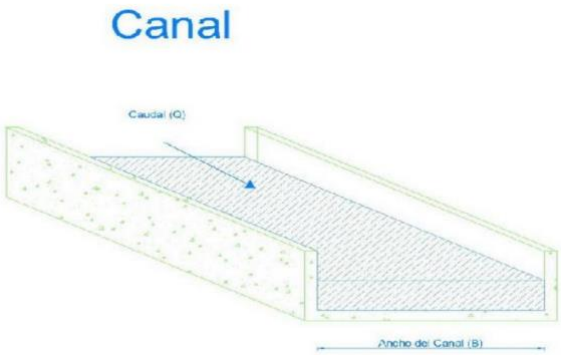
Fuente: Elaboración Grupal

ESCALERAS

1.- Caudal unitario

$$q_u = \frac{Q}{B}$$

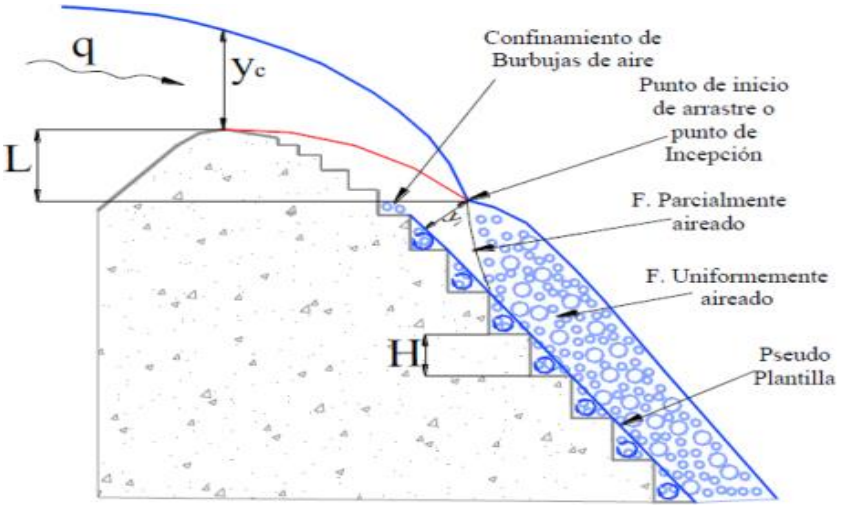
qu	2.5	m2/s



2.- Calado crítico

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q_u^2}{g}}$$

yc	0.86	m



3.- Ley de distribución de velocidades

Coeficiente de Coriolis	αcoriolis
Ley de distribución de velocidades	Ncoriolis

1.03	<	α	<	1.36	(Experimentales)
3.5	<	N	<	4	(Frizell y Tozzy)

αcoriolis	1.2
Ncoriolis	3.5

4.- Dimensiones del escalón

$$\boldsymbol{h \geq 0.0764 * q^{\frac{2}{3}}\ (M.Tozzi)}$$

h	0.465	m

$$\boldsymbol{h_{ópt} = 0.3\ y_c}$$

yc	0.86	(m)
hopt	0.26	(m)

Alturas mínimas en función del caudal unitario

q (m2/s)	yc (m)	hopt (m)
1	0.47	0.14
2	0.74	0.22
5	1.37	0.41
7	1.71	0.51
10	2.17	0.65
12	2.45	0.73

q	2.5	m2/s		
2.0 m2/s	0.74 m		2	0.22 m
5.0 m2/s	1.37 m		5	0.41 m
			hopt	0.25 m
yc	0.85			

5.- Dimensionamiento del perfil escalonado de diseño

$$\frac{h}{l} = i$$

(Δ)	22.00	(m)
(i)	0.40	(m/m)

$$\#de\ contrahuellas = \frac{\Delta}{hasum}$$

# de contrahuellas	18.33
# de contrahuellas	18.00

$$\#de\ huellas = \#de\ contrahuellas - 1$$

#de huellas	17.00

$$H_d = \#\ de\ contrahuellas * h_{asum}$$

Hd	21.60	(m)

$$L_d = \#\ de\ huellas * l_{asum}$$

Ld	51	(m)

$$L_r = \sqrt{H_d - L_d}$$

Lr	55.39	(m)

6.- Chequeo de Flujo escalón por escalón

$$\frac{y_c}{h} < 0.89 - \frac{0.4h}{l}\ (Chanson\ 2002)$$

yc/h	0.72
0.89-0.4h/l	0.73
	OK

7.- Calado en la orilla del escalón

$$y_b = 0.715 * y_c\ (Chanson\ 2002)$$

yb	0.62	(m)

8.- Longitud de la caída

$$L_c = 4.30 * h * \left(\frac{h}{l}\right)^{0.81}\ (Chanson\ 2002)$$

Lc	2.46	(m)

9.- Profundidad del flujo en el escalón

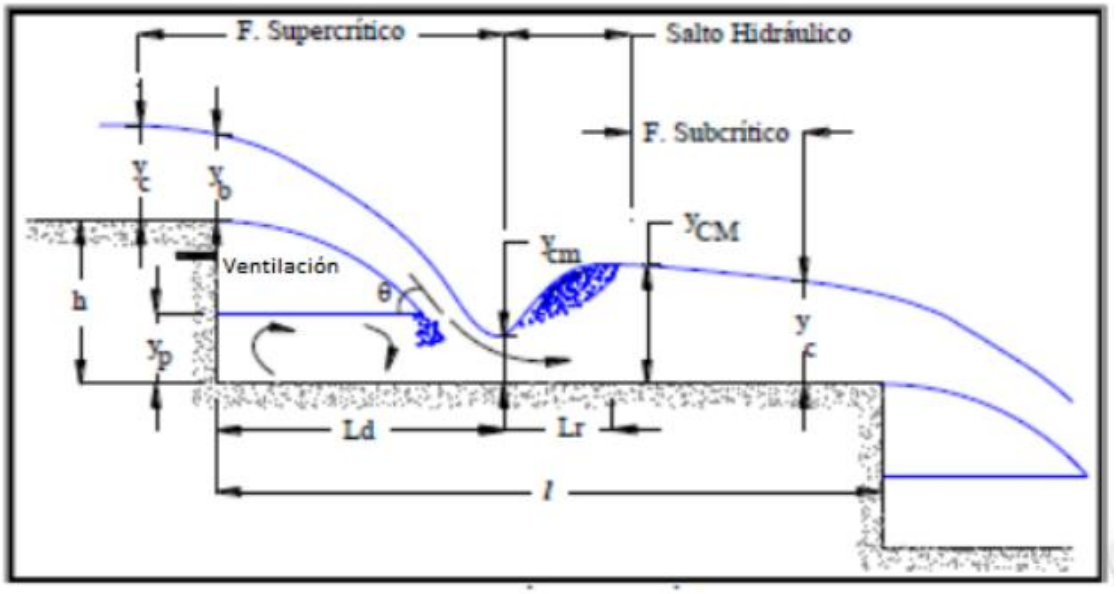
$$y_p = h * \left(\frac{h}{l}\right)^{0.66} \quad (Chanson\ 2002)$$

yp	0.66	(m)

10.- Calado conjugado menor

$$y_{cm} = 0.54 * h * \left(\frac{h}{l}\right)^{1.275} \quad (Chanson\ 2002$$

ycm	0.20	(m)



11.- Energía al inicio del disipador

$$E_1 = \frac{2}{3} y_c + \Delta$$

E1	22.5736483

12.- Energía disipada

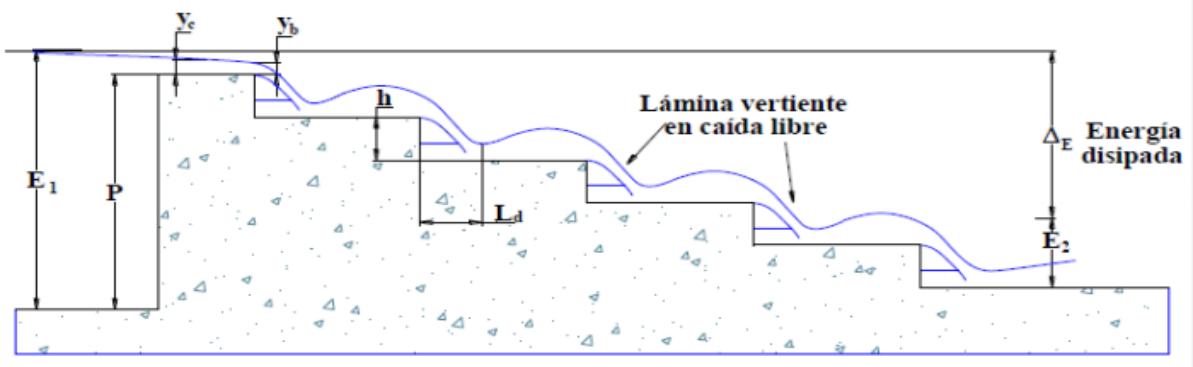
$$\Delta E = \Delta - y_c$$

ΔE	21.14

14- Energía al pie del disipador

$$E_2 = E_1 - \Delta E$$

E2	1.43



14.- Altura de pared

$$h_p = y_p + y_c$$

yc	0.86
yp	0.66

hp	1.52

ESCALERAS AUTO AIREADAS

Restricción para el uso de perfil escalonado auto aireado (Sandeep y Ramesh 2000)

$$\frac{\Delta}{y_c} < 10$$

Δ	22	m

Δ/yc	25.57

No cumple

Caudal Unitario

$$q_u = \frac{Q}{B}$$

Q	15	(m3/s)
B	1	(m)
qu	15	m2/s

Calado Crítico

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q_u^2}{g}}$$

yc	2.84	m
Δ	22	m
Δ/yc	7.74	

Cumple

Calado Normal (Boes y Hager 2003)

$$y_n = y_c * 0.215(sen\ \propto)^{1/3}$$

yn	0.58	m

Relación yc/h Flujo Rasante

Dimensionamiento del escalón

$$\frac{y_c}{h} = 1.2 - 0.325 * \frac{h}{l}; para\ 0.5 \leq \frac{h}{l} \leq 1.7\ (Chanson\ 2002) \qquad h_{ópt} = 0.3\ y_c$$

h/l	0.5	(asumido)				
h	2.74	m		hopt	0.85	m
l	5.48	m				
hasum	2.75	m		∝_d	28.81	
lasum	5.00	m				

Dimensionamiento del perfil escalonado de diseño

$$\frac{h}{l} = i$$

Δ	22	m
h/L	0.55	(m/m)

$$\#de\ contrahuellas = \frac{\Delta}{hasum}$$

# de contrahuellas	8.00
# de contrahuellas	8.00

$$\#de\ huellas = \#de\ contrahuellas - 1$$

#de huellas	7.00

$$H_d = \#\ de\ contrahuellas * h_{asum}$$

Hd	22.00	(m)

$$L_d = \#\ de\ huellas * l_{asum}$$

Ld	110.00	(m)

$$L_r = \sqrt{H_d - L_d}$$

Lr	112.18	(m)

Chequeo de Flujo Rasante (Chason 2002)

$$\frac{y_c}{h} > 1.20 - 0.325 * \frac{h}{l}$$

yc/h	1.03
1.20-0.25*h/l	1.02
	ok

Restricción para el uso de perfil escalonado auto aireado REVISIÓN (Sandeep y Ramesh 2000)

Δ/yc	7.74		ok				
h. Longitud hasta el punto de incepción							
h.1. Rugosidad Relativa del Escalón							
k	1.375		$k = h * cos \propto$				

Froude de Rugosidad (Chamani)

$$F_i = \frac{q_u}{\sqrt{g * \frac{h}{l} * k^3}}$$

Fri	4.01

Longitud hasta el punto de incepción

$$L_i = k * 9.6528 * F_i^{0.7737} \ (Gerardo\ Rendó$$

Li	38.83	m

$$L_i = \frac{9.72 * q_u^{0.86} * cos \propto_d}{(g * sen \propto_d)^{0.43} * h^{0.29}} \ (Boes, 2000)$$

Li	33.44	m

Calado en el Punto de Incepción

Froude de Rugosidad (Chason)

$$F * = \frac{q_u}{\sqrt{g * sen \propto * K^3}}$$

F*	1.98

Calado en el Punto de Incepción

$$y_i = k * \frac{0.4034}{(sen \propto)^{0.04}} * (F *)^{0.592}$$

yi	0.84	m

Concentración media de aire

$$\bar{C} = 0.9 * sen \propto_d$$

$\bar{C}$	0.43
$\bar{C}$	43.37

Factor de Fricción para flujo aireado

$$f_e = 0.124(1 + \tanh\left(2.5 * \frac{0.5 - \bar{c}}{\bar{c}(1 - \bar{c})}\right)$$

$\bar{c}$	0.43
si c < 0.1	0.1
fe	0.20

Factor de Fricción para flujo aireado

αcoriolis	Coeficiente de Coriolis					
Ncoriolis	de distribución de velocidad					
	1.03	<	α	<	1.36	(Experimentales)
	3.5	<	N	<	4	(Frizell y Tozzy)
	αcoriolis	1.2				
	Ncoriolis	3.5				

Parámetro de vertido

$$A = \left(\frac{fe}{8 * sen \propto_d}\right)^{\frac{1}{3}} * \cos \propto_d + \frac{\propto_d}{2} * \left(\frac{fe}{8 * sen \propto_d}\right)^{\frac{2}{3}}$$

A	2.31

Energía al inicio del disipador

$$E_1 = \frac{2}{3} y_c + \Delta$$

E1	23.89

Energía disipada

$$\Delta E = y_c * \left(\frac{3}{2} + \frac{\Delta}{y_c} - A\right)$$

ΔE	19.70

Energía al pie del disipador

$$E_2 = E_1 - \Delta E$$

E2	4.19

Calado al final del perfil escalonado

$$y_2 = \frac{Q}{b\sqrt{E_2 * 2 * g}}$$

y2	1.65	m

Altura de agua para un flujo aireado al 90% en una distancia Li<x<=Lr

$$y_{90} = 0.55 * \left(\frac{q_u^2 * h}{g * sen \propto_d}\right)^{\frac{1}{4}} * \tanh\left(\sqrt{\frac{g * h * sen \propto_d}{3 * q_u(x - Li)}} + 0.42\left(\frac{q_u^{10} * h^3}{(g * sen \propto_d)^5}\right)^{\frac{1}{18}}\right)$$

qu	15				
h	2.75		x	100	m
$\propto_d$	28.81		Li	38.83	m
g	9.81				
	1.86	*0.07*	*1.4536326*		
y90	1.69	m			

Altura de agua para un flujo aireado al 18% para una distancia 100 m

$$y_c\% = \frac{y_{90} * \overline{C} * 100}{90}$$

yc%	0.82

Altura de paredes del Canal

$$y_d = 1.2 * y_{90}$$

yd	2.029	m
yd	2.000	m

Profundidad del flujo en el escalón

$$y_p = h * \left(\frac{h}{l}\right)^{0.66} \quad (Chanson\ 2002)$$

yp	1.85	(m)
yt	3.85	m

5. CONCLUSIONES

- Existe una gran variedad de disipadores de energía que pueden ser instalados en una obra hidráulica tales como pozos disipadores, disipadores tipo escaleras, disipador de tubo tipo vórtice, entre otras. Por el cual, dichas estructuras son construidas con el objetivo de conservación de la obra y evitar daños aguas abajo debido a las altas velocidades producidas por la variación de altura (carga), por lo que la importancia de implementar estas estructuras es imprescindible.

- El diseño de una rápida en forma de escalera parte del análisis del régimen de flujo del caudal de diseño. Si esta es saltante, rasante o transicional. Debido a que el principal problema de este diseño es la cavitación, para un flujo rasante, la disipación de energía se produce debido a la rugosidad de los escalones, reduciendo de esta manera la velocidad del flujo y con ello, la cavitación, en cambio, si el flujo es saltante, la cavitación se evitará en cada escalón, es decir, el flujo de agua se rompe con cada grada y permite la introducción de aire al mismo.

- Se puede observar que para canales que tienen auto aireación la longitud es mayor, pues esta depende absolutamente del coeficiente de aire, y este es proporcional a al ángulo que se forma entre los escalones, mientras menor sea el aire, menor la concentración de aire.

- Estos canales escalonados han sido utilizados desde épocas antiguas, los romanos ya las utilizaban para poder disipar energía y la velocidad de agua en algunas tomas de ríos, en la actualidad se puede observar algunos de estos canales tanto en China, como en Perú y Ecuador.

6. RECOMENDACIONES

- El porcentaje de aire en el agua debe ser superior al 8% para evitar problemas de cavitación, ya que logrando un fluido que sea mezcla de agua y pequeñas burbujas de aire, este fenómeno se controla.
- El porcentaje de aire puede ser controlado al utilizar dimensiones de gradas (escalones) que posean las relaciones propuestas por diversas investigaciones, entre estas las de Chason.
- Una buena manera de disipar energía, son los canales escalonados, estos además de ser económicos son factibles, el problema, son las grandes longitudes que este necesita para disipar energía.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chanson, H. (1994 a.) Comparison of Energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes, Journal of Hydraulic Research.

Chanson, H. (1994 b.) Hydraulics of skimming flow over step channels and spillways. Journal of Hydraulic Research.

ESSAP. (2014). La importancia del agua potable. Recuperado de esaap.com.py: http://www.essap.com.py/32217a53b4c76b11a4d967a6ff0dfc14/

Matos, J. (1994) Discussion for paper of Chanson (1994 and b) in Journal of Hydraulic Research.

Noksel. (2015). Breve historia de las conducciones. Recuperado de iagua.es: https://www.iagua.es/noticias/noksel-espana/breve-historia-conducciones

Rosado, G. (2017). Metodología para el diseño de canales escalonados, disipadores de energía, empleados en drenaje urbano, basada en modelación física. Recuperado de: http://bdigital.unal.edu.co/62912/1/1065611941.2018.pdf

Technische Universitaet Desden (s.f.) Hydraulic Design of Pooled Step Cascades. Recuperado de http://rcswww.urz.tu-dresden.de/~daigner/CASCADE.htm (Alemania)

Del Toro, Nataly. (2013). BASES Y CRITERIOS DE DISEÑO DE CANALES CON FLUJO ESCALONADO Y SUJETOS A AIREACIÓN NATURAL (TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. Recuperado de: http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/2199/1/T-UCE-0011-60.pdf

8. ANEXOS

Aliviaderos en forma de Escaleras en Grecia.

James Bay Project

Una serie de estaciones de hidroeléctricas ubicados en La Grande River (El Río La Grande) en el Norte de Canada,